新疆南疆地区肉羊常用精饲料体外产气量与有效降解率的相关性分析

马绍楠[1,2] 许贵善[1,3*] 王晓慧[1] 张 楷[1] 潘小丽[1] 马 涛[2] 刁其玉[2*]

（1.塔里木大学动物科学学院，阿拉尔 843300；2.中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点实验室，北京 100081；3.新疆生产建设兵团塔里木畜牧科技重点实验室，阿拉尔 843300）

摘 要：本试验分析了新疆南疆地区肉羊常用精饲料体外产气量与有效降解率的相关性，旨在寻找肉羊常用精饲料干物质有效降解率的简易评价方法。以新疆南疆地区肉羊常用的 6 种蛋白质饲料和 7 种能量饲料为试验材料，采用体外产气法与人工瘤胃持续发酵法，在测定产气量（GP）与干物质有效降解率的同时，分析二者之间的相关性及常规营养成分对干物质有效降解率的影响，建立了以 GP、常规营养成分预测干物质有效降解率的模型。结果显示：1）潜在产气量及 8、16、24、36、48 h 产气量均与干物质有效降解率呈正相关关系（$P<0.05$）；以相关性最强的 3 个预测值潜在产气量及 24 和 36 h 产气量为预测因子，分别建立干物质有效降解率的预测模型，其决定系数（R^2）分别为 0.553、0.613 和 0.612。2）饲料常规营养成分含量与干物质有效降解率的相关性分析结果中，干物质有效降解率与饲料中性洗涤纤维（NDF）含量呈显著负相关关系（$P<0.05$），与饲料酸性洗涤纤维（ADF）含量呈极显著负相关关系（$P<0.01$）；建立以 ADF、NDF 含量预测饲料干物质有效降解率的一元、二元预测模型，二元预测模型[ED_{IVDMD}=88.481-0.484ADF-0.231NDF（$P<0.01$）（ED_{IVDMD} 为干物质有效降解率）]R^2 最高，为 0.855。综合得出,体外产气法可以代替尼龙袋法预测肉羊常用精饲料的干物质有效降解率，可对饲料的降解性能做出快速、合理、有效的评价；利用饲料中的纤维含量来预测其他主要营养物质在瘤胃内降解率的方法切实可行。

关键词：体外产气法；人工瘤胃持续发酵法；产气量；干物质有效降解率；精饲料；预测模型

中图分类号：S826

收稿日期：2017-09-

基金项目：新疆生产建设兵团博士资金专项经费资助（2014BB017）；塔里木大学2016年校级研究生科研创新项目（TDGRI201605）；国家肉羊产业技术体系建设专项资金（CARS-38）

作者简介：马绍楠（1992-），女，回族，新疆乌鲁木齐人，硕士研究生，从事反刍动物生理营养研究。E-mail: mashaonansls@163.com

*通信作者：许贵善，副教授，硕士生导师，E-mail: guishanxu@126.com；刁其玉，研究员，博士生导师，E-mail: diaoqiyu@caas.cn

新疆维吾尔族自治区面积占全国总面积的1/6，其中天山以南的部分称为南疆，面积约108万 km^2，是穆斯林群众的主要聚集区。独特的地理条件和文化传统形成了南疆以牛羊养殖为主的畜牧业生产结构，在我国“一带一路”战略的实施过程中有着重要地位[1]。南疆地处暖温带，属典型的大陆性气候，是内陆干旱风沙区。南疆光热资源丰富、昼夜温差大、无霜期长，适合农作物生长，但严重的土地盐碱化却影响着农作物的多样性，从而引发了饲草料短缺问题，制约着当地畜牧业的发展[2]。因此，对新疆南疆地区肉羊精、粗饲料资源的开发和评价十分必要。因反刍动物特殊的瘤胃内环境所致，单一精饲料的营养价值评定伴随着瘤胃酸中毒等一系列不良反应，因此，如何评定谷物饲料和蛋白质饲料的营养价值是摆在研究者面前的一个难题[3]。近年来，有研究者针对此问题进行了一些研究。赵江波[4]使用套算法评价小麦在瘤胃内的消化利用情况，证明了该方法在肉羊单一精饲料原料营养价值评定上的可行性，并确定了适宜替换水平。吴端钦[5]对多种羊常用精饲料进行了消化代谢试验、体外产气试验和康乃尔净碳水化合物-蛋白质体系(CNCPS)指标的测定，研究表明,精饲料有效能的体外法预测值与体内法实测值相关性强，通过体外产气法和CNCPS评价体系可以快速、有效地预测精饲料能值。Norman等[6]分别采用体外法（胃蛋白酶-纤维素酶法和体外产气法）和半体内法（尼龙袋法）测定11种澳大利亚本土多年生灌木的有机物降解率，然后与体内法实测的有机物降解率进行比较，结果表明体外产气法得出的有机物降解率与体内法相关性最强[决定系数（R^2）=0.904]，而胃蛋白酶-纤维素酶法预测的准确性相对较差。任鹏等[7]用瘤胃持续发酵法测定了6种饼粕饲料蛋白质的降解率，其测定结果的稳定性优于尼龙袋法，平均变异系数为2.7%，结果与尼龙袋法的结果高度相关(R^2=0.99)。本试验结合饲料的常规营养成分分析、体外产气法与人工瘤胃持续发酵法，以6种蛋白质饲料和7种能量饲料为研究对象，测定其常规营养成分含量、各时间点的产气量以及干物质（DM）有效降解率，建立了用精饲料产气量预测干物质有效降解率及常规营养成分预测干物质有效降解率的模型，为探索更加简便、易行的精饲料质量评价方法、合理利用新疆南疆地区饲料资源提供基础理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验所选用的13种精饲料包括蛋白质饲料6种[豆粕、棉籽粕、玉米干酒糟及其可溶物（DDGS）、玉米蛋白粉、鱼粉和鸡肉粉]和能量饲料7种（菊花粕、玉米、喷浆玉米皮、未喷浆玉米皮、麸皮、次粉、面粉），饲料原料均采集自新疆阿克苏地区。

1.2　试验方法

1.2.1　饲料常规成分分析

干物质和粗灰分（Ash）含量测定参照张丽英[8]的方法，粗蛋白质（CP）含量采用全自动凯氏定氮仪测定，粗脂肪（EE）含量采用全自动脂肪测定仪，中性洗涤纤维（NDF）和酸性洗涤纤维（ADF）含量采用 Van Soest[9]的方法，钙、磷含量参考《中国饲料成分及营养价值表》（2014 年第 25 版）。

1.2.2　体外产气试验

瘤胃培养液的制备：人工瘤胃液采用 Menke 等[10]方法制备。选择 3 只健康无病、体重为(30±1.5) kg、装有永久性瘤胃瘘管的多浪羊为瘤胃液供体羊，于晨饲前 1 h 采集瘤胃液，用 4 层纱布过滤放入已经预热的 39 ℃保温瓶，迅速带回实验室。人工瘤胃液由微量元素溶液(A 液)、缓冲溶液(B 液)、常量元素溶液(C 液)、刃天青溶液和还原剂溶液组成。将人工瘤胃液与瘤胃液按照 2:1 混合作为体外瘤胃培养液。

活体发酵试验过程：称取粉碎过筛后的 14 种精饲料风干样品（每种样品 2 个重复）于洗净的产气瓶中，同时做 2 个空白样；将分装好样品的产气瓶放入恒温摇床上进行培养，连接体外产气监测系统（ANKOM，RFS 产气测量系统），设定每 0.5 h 记录 1 次数据，培养 48 h。后人为选择 2~48 h 中偶数整数时间点共 24 个进行产气量统计分析。

1.2.3　人工瘤胃持续发酵试验

体外瘤胃培养液制备同 1.2.2。

样品的准备：将称量完毕的待测样品用纸带送入尼龙袋底部，用尼龙绳将装有样品的尼龙带绑紧，称重，同时制作空白样（即在尼龙袋中不加入饲料样品）。随后放入烘箱 60 ℃条件下烘干至恒重。

样品的分装和培养：待测样品在培养箱中的培养时间点分别设为 2、4、8、16、24、36 和 48 h。将 4 个发酵瓶分别编为 1、2、3、4 号，1 号瓶中放入 2 和 48 h 2 个时间段的尼龙袋，2 号瓶中放入 4 和 36 h 的尼龙袋，3 号瓶中放入 8 和 36 h 的尼龙袋，4 号瓶中放入 16 h 的尼龙袋，发酵罐提前放入瘤胃体外模拟装置（ANKOM Daisy 自动体外培养箱）中预热。用量筒向每个发酵瓶中分别加入 1 200 mL 制备好的体外瘤胃培养液，同时在发酵瓶瓶口通入 CO_2 约 30 s，迅速盖上盖子，转入人工瘤胃培养箱中培养。

尼龙袋的取出和处理：将装有待测样品的尼龙袋放入培养箱后，开始记录培养时间。每到一个时间点需将该时间点的尼龙袋取出，浸泡在冰水中，并立即用自来水冲洗。在冲洗过程中可用手轻轻挤压，直至水澄清为止。在冲洗过程中应防止尼龙袋中残余物的损失。将洗净过的尼龙袋（连同之中的残余物）置于 60 ℃烘箱内干燥至恒重，取出称重需精确至 0.000 1 g。

1.3 计算公式

1.3.1 体外产气试验

产气参数的计算基于Ørskov 等[11]提出的产气模型：

$$GP=a+b(1-e^{-ct})。$$

式中：GP 为 t 时刻的产气量（mL/g）；a 为快速产气部分产气量（mL/g）；b 为慢速产气部分产气量(mL/g)；c 为产气速率(%/h)；$a+b$ 为潜在产气量(mL/g)。用 SAS 9.3 处理软件 NLIN(Nonlinear regression)程序计算 a、b、c 值。1.3.2 人工瘤胃持续发酵试验

采用以下公式计算干物质不同时间点的降解率：

$$A=100\times(B-C)/B。$$

式中：A 为待测饲料的干物质某一时间点的消失率(%)；B 为待测样品中干物质的含量(%)；C 为待测样品尼龙袋残渣中干物质含量(%)。

参照Ørskov 等[11]提出的瘤胃动力学数学模型计算各时间点干物质降解率和干物质有效降解率，计算公式为：

$$dP=a+b(1-e^{-ct})；$$

$$ED=a+bc/(k+c)。$$

式中：dP 为待测饲料的干物质瘤胃某一时间点的降解率(%)；a 为快速降解部分含量（%）；b 为慢速降解部分含量（%）；c 为慢速降解部分的降解速率（%/h）；t 为瘤胃内培养时间（h）；ED 为有效降解率（%）；k 为瘤胃外流速率，本试验中 k 值取 0.022 1%/h[7]。

1.4 数据统计分析

所有数据先采用 Excel 2016 进行初步整理。使用 SAS 9.3 处理软件中单因素方差分析(one-way ANOVA)程序进行显著性检验。Duncan 氏多重比较差异性，当 $P<0.05$ 表示差异显著，$P>0.05$ 表示差异不显著。对体外产气试验及人工瘤胃持续发酵试验所得的数据进行整理后，使用 SPSS22.0 对变量进行 Pearson 相关性分析和线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 6 种蛋白质饲料及 7 种能量饲料的营养物质含量分析

分析测定的 6 种蛋白质饲料和 7 种能量饲料的常规营养成分含量分别见表 1 和表 2。

表 1 6 种蛋白质饲料的常规营养成分含量（干物质基础）

Table 1 Common nutrient component contents of six protein feedstuffs （DM basis） %

项目 Items	玉米蛋白粉 Corn gluten meal	豆粕 Soybean meal	棉籽粕 Cottonseed meal	玉米干酒糟及其可溶物 DDGS	鸡肉粉 Chicken meal	鱼粉 Fish meal
干物质 DM	90.17	89.00	89.88	90.36	95.38	91.97
粗蛋白质 CP	60.13	45.96	44.46	34.30	69.86	67.16
粗脂肪 EE	1.82	1.90	0.89	9.80	12.28	10.82
有机物 OM	99.00	93.90	93.50	94.90	85.00	84.20
中性洗涤纤维 NDF	8.70	13.60	28.30	28.50	0.00	37.20
酸性洗涤纤维 ADF	4.60	9.60	19.40	12.32	0.00	25.10
钙 Ca	0.06	0.34	0.24	0.05	3.50	4.56
磷 P	0.42	0.65	1.06	0.71	1.95	2.88

表 2 7 种能量饲料的常规营养成分含量（干物质基础）

Table 2 Common nutrient component contents of seven energy feedstuffs （DM basis） %

项目 Items	菊花粕 Chrysanthemum meal	玉米 Corn	喷浆玉米皮 Sprayed corn husk	未喷浆玉米皮 Unsprayed corn husks	麸皮 Bran	次粉 Wheat middling	面粉 Wheat flour
干物质 DM	93.50	87.65	91.91	93.59	88.10	88.00	87.40
粗蛋白质 CP	9.62	9.68	19.58	10.03	16.10	15.70	13.70
粗脂肪 EE	4.82	2.90	1.90	1.76	3.40	2.30	1.70
有机物 OM	91.73	98.90	95.12	98.35	95.00	98.50	98.50
中性洗涤纤维 NDF	46.12	8.90	53.95	55.75	39.60	19.30	10.90
酸性洗涤纤维 ADF	29.21	2.80	15.07	16.24	12.20	4.80	2.20
钙 Ca	0.86	0.02	0.13	0.09	0.11	0.08	0.08
磷 P	0.28	0.27	0.45	0.11	0.92	0.48	0.31

2.2 6 种蛋白质饲料和 7 种能量饲料的产气量和产气参数

2.2.1 6 种蛋白质饲料的产气量和产气参数

由表 3 可见，6 种蛋白质饲料的产气量均随着时间的增加而升高。2 h 时，6 种蛋白质饲料的产气量差异较大。48 h 时，各种蛋白质饲料产气量差异显著（P<0.05），其中豆粕的产气量为 87.44 mL/g，最高，鸡肉粉为 39.75 mL/g，最低；棉籽粕的产气量在 4 h 与豆粕差异不显著（P>0.05），36 h 开始趋于稳定，48 h 达 63.64 mL/g，仅次于豆粕，与玉米蛋白粉接近；DDGS 在 2 h 的产气量为 19.78 mL/g，显著低于玉米蛋白粉、豆粕、棉籽粕、鱼粉（P<0.05），在 48 h 达 54.78mL/g；鱼粉、鸡肉粉在 48 h 的产气量分别为 49.51、39.75 mL/g。

表 3 6 种蛋白质饲料体外发酵 48 h 的产气量

Table 3 Gas production of six protein feedstuffs during 48 h *in vitro* fermentation mL/g

时间 Time/h	玉米蛋白粉 Corn gluten meal	豆粕 Soybean meal	棉籽粕 Cottonseed meal	玉米干酒糟及其可溶物 DDGS	鸡肉粉 Chicken meal	鱼粉 Fish meal
2	33.95±2.14^{c}	40.88±0.96^{a}	39.11±1.67^{b}	19.78±0.94^{d}	31.07±1.03^{c}	23.23±1.58^{d}
4	36.14±1.96^{b}	41.56±0.64^{a}	41.38±1.67^{a}	24.78±0.61^{d}	32.02±0.58^{c}	23.90±1.36^{d}
6	37.85±1.84^{c}	45.88±0.64^{a}	42.29±1.67^{b}	28.64±0.29^{e}	32.48±0.58^{d}	24.35±1.35^{f}
8	39.71±1.84^{c}	49.74±0.32^{a}	42.74±1.67^{b}	31.82±0.28^{d}	33.61±0.90^{d}	24.76±1.28^{e}
10	40.21±1.82^{c}	52.92±0.32^{a}	44.11±1.67^{b}	34.78±0.28^{d}	34.52±0.90^{d}	25.44±0.96^{e}
12	40.62±1.82^{c}	55.19±0.32^{a}	45.02±1.67^{b}	37.51±0.04^{d}	35.43±0.90^{d}	25.89±0.96^{e}
16	42.07±1.80^{c}	58.37±0.32^{a}	46.83±1.03^{b}	42.73±0.37^{c}	36.11±0.58^{d}	26.12±0.64^{e}
20	44.90±1.32^{d}	62.69±0.00^{a}	50.01±1.03^{b}	46.82±0.37^{c}	37.93±0.58^{e}	28.16±0.32^{f}
24	47.52±1.16^{d}	65.87±0.00^{a}	52.51±0.70^{b}	49.55±1.02^{c}	39.29±0.07^{e}	30.21±0.00^{f}
28	49.22±0.99^{d}	68.14±0.00^{a}	54.10±1.03^{bi}	51.60±0.70^{c}	40.66±0.07^{e}	32.48±0.00^{f}
32	51.26±0.67^{d}	77.45±0.32^{a}	55.69±0.70^{b}	52.96±0.70^{c}	42.24±0.39^{e}	34.07±0.32^{f}
36	54.67±0.35^{c}	81.08±0.32^{a}	57.96±0.70^{b}	54.10±1.02^{c}	44.52±0.25^{d}	36.34±0.32^{e}
40	57.74±0.19^{c}	84.72±0.32^{a}	60.91±0.38^{b}	54.32±1.02^{d}	46.11±0.58^{e}	38.16±0.32^{f}
44	59.67±0.35^{c}	86.99±0.32^{a}	62.73±0.38^{b}	54.55±1.02^{d}	47.92±0.58^{e}	39.07±0.32^{f}
48	60.58±0.35^{c}	87.44±0.32^{a}	63.64±0.38^{b}	54.78±1.02^{d}	49.51±0.90^{e}	39.75±0.64^{f}

同行数据肩标不同小字母表示差异显著（P<0.05）。表 4~表 8 同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05). The same as Table 4 to Table 8.

由表 4 可见，6 种蛋白质饲料的潜在产气量由高至低为豆粕（81.00 mL/g）、棉籽粕（54.66 mL/g）、DDGS（54.10 mL/g）、玉米蛋白粉（53.77 mL/g）、鱼粉（41.38 mL/g）、鸡肉粉（33.98 mL/g）；产气速率为鱼粉>棉籽粕>玉米蛋白粉>鸡肉粉>DDGS>豆粕。

表 4　6 种蛋白质饲料体外发酵 48 h 的产气参数

Table 4　Gas production parameters of six protein feedstuffs during 48 h *in vitro* fermentation

项目 Items	玉米蛋白粉 Corn gluten meal	豆粕 Soybean meal	棉籽粕 Cottonseed meal	玉米干酒糟及其可溶物 DDGS	鸡肉粉 Chicken meal	鱼粉 Fish meal
潜在产气量 Potential GP/(mL/g)	53.77±0.37^{b}	81.00±0.01^{a}	54.66±0.24^{b}	54.10±1.37^{b}	41.38±0.18^{c}	33.98±1.09^{d}
产气速率 GR rate/(%/h)	0.22±0.07^{b}	0.10±0.00^{b}	0.32±0.08^{a}	0.11±0.01^{b}	0.39±0.06^{a}	0.21±0.10^{b}

2.2.2　7 种能量饲料的产气量和产气参数

由表 5 可见，7 种能量饲料的产气量均随着时间的增加而升；高菊花粕在 2 h 的产气量为 43.38 mL/g，在 48 h 达到 107.66 mL/g，均显著高于其他 6 种能量饲料（P<0.05）；麸皮在 2 h 的产气量为 15.33mL/g，在 48 h 达到 60.53mL/g，均显著低于其他 6 种能量饲料（P<0.05）；面粉在 2 h 产气量为 30.43 mL/g，8 h 达到 83.90 mL/g，之后逐渐趋于稳定，前 6 h 产气量升高幅度最大；玉米在 24 h 的产气量显著高于其他 6 种能量饲料（P<0.05），达到 95.62 mL/g，之后趋于稳定。

表 5　7 种能量饲料体外发酵 48 h 的产气量

Table 5 Gas production of seven energy feedstuffs during 48 h *in vitro* fermentation mL/g

时间 Time/h	菊花粕 Chrysanthemum meal	玉米 Corn	喷浆玉米皮 Sprayed corn husk	未喷浆玉米皮 Unsprayed corn husks	麸皮 Bran	次粉 Wheat middling	面粉 Wheat flour
2	43.38 ± 0.96^{a}	17.49 ± 1.41^{e}	32.84 ± 0.21^{b}	9.08 ± 0.61^{g}	15.33 ± 1.12^{f}	22.94 ± 0.32^{d}	30.43 ± 1.28^{c}
4	46.11 ± 2.25^{b}	32.71 ± 1.41^{e}	38.61 ± 0.07^{d}	14.54 ± 0.19^{g}	27.82 ± 0.16^{f}	40.20 ± 0.32^{c}	59.51 ± 1.28^{a}
6	50.42 ± 2.57^{c}	47.92 ± 1.09^{d}	43.89 ± 0.32^{e}	19.53 ± 0.83^{g}	36.91 ± 0.16^{f}	50.88 ± 0.32^{b}	73.63 ± 1.03^{a}
8	53.60 ± 1.93^{d}	60.87 ± 0.77^{b}	49.34 ± 0.32^{e}	25.44 ± 1.48^{g}	44.18 ± 0.48^{f}	59.05 ± 0.00^{c}	83.90 ± 0.45^{a}
10	57.92 ± 1.61^{d}	71.54 ± 0.77^{b}	54.56 ± 0.32^{e}	31.34 ± 1.80^{g}	49.63 ± 0.80^{f}	64.05 ± 0.32^{c}	84.99 ± 0.77^{a}
12	63.14 ± 1.28^{c}	84.54 ± 0.70^{a}	59.11 ± 0.64^{d}	37.02 ± 1.80^{f}	53.60 ± 0.64^{e}	67.23 ± 0.00^{b}	85.53 ± 0.83^{a}
16	69.73 ± 1.61^{c}	91.11 ± 0.69^{a}	66.15 ± 0.96^{d}	45.61 ± 1.73^{f}	57.01 ± 0.64^{e}	69.50 ± 0.32^{c}	86.53 ± 0.64^{b}
20	74.95 ± 0.64^{c}	94.71 ± 0.58^{a}	72.55 ± 0.26^{d}	54.01 ± 1.41^{f}	58.03 ± 0.80^{e}	69.73 ± 0.32^{d}	86.58 ± 0.39^{b}
24	84.04 ± 0.64	95.62 ± 0.58^{a}	76.64 ± 0.26^{d}	60.82 ± 1.41^{f}	58.26 ± 0.80^{g}	70.45 ± 0.39^{e}	86.76 ± 0.32^{b}
28	87.44 ± 0.32^{b}	95.62 ± 0.58^{a}	79.09 ± 0.64^{c}	66.50 ± 1.09^{e}	58.60 ± 0.64^{f}	76.99 ± 0.32^{d}	87.22 ± 0.64^{b}
32	90.85 ± 0.64^{b}	95.16 ± 0.58^{ab}	80.48 ± 0.61^{d}	71.32 ± 1.48^{f}	59.05 ± 0.64^{g}	77.90 ± 0.32^{e}	87.32 ± 0.78^{c}
36	95.39 ± 0.64^{a}	94.71 ± 0.58^{a}	81.16 ± 0.29^{c}	74.27 ± 1.16^{e}	59.62 ± 0.80^{f}	78.36 ± 0.64^{d}	87.35 ± 0.51^{b}
40	98.57 ± 0.64^{a}	93.57 ± 0.58^{b}	80.82 ± 0.45^{d}	76.72 ± 1.73^{f}	59.73 ± 0.32^{g}	78.58 ± 0.64^{e}	86.44 ± 0.19^{c}
44	106.75 ± 0.00^{a}	93.35 ± 0.58^{b}	80.47 ± 0.62^{d}	78.08 ± 2.05^{f}	60.30 ± 0.48^{g}	79.49 ± 0.32^{e}	86.53 ± 1.28^{c}
48	107.66 ± 0.64^{a}	92.67 ± 0.58^{b}	80.02 ± 0.93^{d}	78.76 ± 2.05^{f}	60.53 ± 0.16^{g}	79.95 ± 0.32^{e}	86.08 ± 1.28^{c}

由表 6 可见，7 种能量饲料的潜在产气量由高至低为：菊花粕（101.50 mL/g）、玉米（96.76 mL/g）、面粉（87.32 mL/g）、喷浆玉米皮（83.65 mL/g）、未喷浆玉米皮（82.67 mL/g）、次粉（76.97 mL/g）、麸皮（60.04 mL/g）；产气速率为面粉>麸皮和次粉>玉米>菊花粕和喷浆玉米皮>未喷浆玉米皮。

表 6 7 种能量饲料体外发酵 48 h 产气参数

Table 6 Gas production parameters of seven energy feedstuffs

项目 Items	菊花粕 Chrysanthemum meal	玉米 Corn	喷浆玉米皮 Sprayed corn husk	未喷浆玉米皮 Unsprayed corn husks	麸皮 Bran	次粉 Wheat middling	面粉 Wheat flour
潜在产气量 Potential GP/(mL/g)	101.50 ± 1.84^{a}	96.76 ± 0.47^{b}	83.65 ± 0.45^{d}	82.67 ± 0.91^{e}	60.04 ± 0.61^{g}	76.97 ± 0.15^{f}	87.32 ± 0.62^{c}
产气速率 GR rate/(%/h)	0.08 ± 0.01^{d}	0.14 ± 0.00^{c}	0.08 ± 0.00^{d}	0.04 ± 0.00^{e}	0.17 ± 0.00^{b}	0.17 ± 0.00^{b}	0.29 ± 0.01^{a}

2.3 6 种蛋白质饲料和 7 种能量饲料的干物质降解率

2.3.1 6 种蛋白质饲料的干物质降解率

由表 7 可见，除了 4 h 与玉米蛋白粉干物质降解率差异不显著（P>0.05）外，豆粕在各时间点的干物质降解率均显著高于其他种蛋白质饲料（P<0.05），在 48 h 达到 97.79%；鸡肉粉的干物质降解率在各时间点均显著低于其他 5 种植物类蛋白质饲料（P<0.05），在 48 h 达到 32.67%，仅次于鱼粉的 54.54%。6 种蛋白质饲料的干物质有效降解率为豆粕>玉米蛋白粉>DDGS>棉籽粕>鱼粉>鸡肉粉。

表 7 6 种蛋白质饲料的干物质降解率

Table 7 Degradation rate of DM of six protein feedstuffs *in vitro* %

项目 Items	时间 Time/h	玉米蛋白粉 Corn gluten	豆粕 Soybean	棉籽粕 Cottonseed	玉米干酒糟及其可溶物	鸡肉粉 Chicken meal	鱼粉 Fish meal

		meal	meal	meal	DDGS		
降解率 Degradation rate	2	46.27±4.14[b]	54.23±1.40[a]	41.37±0.01[c]	39.74±0.48[c]	22.64±0.184[d]	40.19±0.11[c]
	4	60.51±2.27[a]	59.56±1.29[a]	43.74±1.41[bc]	45.45±1.95[b]	22.13±1.02[d]	40.06±0.78[c]
	6	58.18±0.19[b]	69.32±1.98[a]	53.34±3.82[b]	55.12±2.19[b]	26.92±3.25[d]	41.40±1.48[c]
	16	74.17±2.84[b]	85.27±0.73[a]	58.01±0.50[c]	73.31±1.40[b]	27.63±0.13[e]	45.93±0.510[d]
	24	74.98±0.20[c]	86.70±0.94[a]	60.61±1.06[d]	78.52±2.65[b]	29.53±0.15[f]	49.70±0.15[e]
	36	85.16±1.27[b]	90.87±0.54[a]	66.88±0.74[d]	81.34±0.19[c]	30.90±0.72[f]	50.21±0.264[e]
	48	88.16±2.99[b]	97.79±0.48[a]	72.84±0.19[c]	87.64±0.73[b]	32.67±0.54[e]	54.54±0.23[d]
有效降解率 Effective degradation rate		77.59±0.95[b]	85.51±0.67[a]	63.52±0.25[d]	74.86±0.82[c]	29.60±0.50[f]	50.32±0.27[e]

2.3.2 7 种能量饲料的干物质降解率

由表 8 可见，菊花粕的干物质降解率在 48 h 干物质降解率最低，为 74.16%；玉米的干物质降解率在前 6 h 快速增加，在 24 h 达 88.44%，之后趋于稳定；喷浆玉米皮和未喷浆玉米皮的干物质降解率随着时间的增加始终呈现大幅度的提高，在 48 h 分别为 90.88%和 89.07%；次粉的干物质降解率在 36 h 达到 80.24%；面粉在 36、48 h 的干物质降解率分别为 90.65%、90.91%与喷浆玉米皮在同一时间点的干物质降解率差异不显著（*P*>0.05），其余各时间点的干物质降解率均显著高于其他 6 种能量饲料（*P*<0.05）；7 种能量饲料的干物质有效降解率为面粉>喷浆玉米皮>玉米>次粉>麸皮>未喷浆玉米皮>菊花粕。

表 8　7 种能量饲料的干物质降解率

Table 8　Degradation rate of DM of seven energy feedstuffs *in vitro*　　%

项目 Items	时间 Time/h	菊花粕 Chrysanthemum meal	玉米 Corn	喷浆玉米皮 Sprayed corn husk	未喷浆玉米皮 Unsprayed corn husks	麸皮 Bran	次粉 Wheat middling	面粉 Wheat flour
降解率 Degradation rate	2	32.88±0.15[f]	36.54±0.49[e]	49.87±0.15[d]	18.57±0.07[g]	53.74±0.07[c]	64.30±0.10[b]	89.06±0.11[a]
	4	36.55±0.13[f]	49.24±0.46[e]	54.50±0.24[d]	22.52±0.16[g]	56.19±0.42[c]	67.34±0.36[b]	89.74±0.24[a]
	6	54.52±0.06[e]	72.41±0.32[b]	64.55±0.50[c]	36.11±0.69[f]	61.34±0.40[d]	71.87±0.33[b]	90.28±0.09[a]
	16	67.99±0.44[e]	85.07±0.10[b]	77.54±0.29[c]	58.79±0.18[g]	65.39±0.02[f]	75.43±0.30[d]	90.54±0.16[a]
	24	69.23±0.37[f]	88.44±0.63[b]	86.29±0.20[c]	73.17±0.62[e]	73.17±0.57[e]	79.55±0.33[d]	90.58±0.14[a]
	36	72.44±0.12[f]	89.29±1.19[b]	90.43±0.60[a]	81.70±0.26[c]	74.56±0.30[e]	80.24±0.38[d]	90.65±0.13[a]
	48	74.16±0.28[f]	90.81±0.42[b]	90.88±0.23[a]	89.07±0.05[c]	75.83±0.21[e]	80.49±0.22[d]	90.91±0.08[a]
有效降解率 Effective degradation rate		65.73±0.24[e]	81.90±0.62[b]	82.11±0.07[b]	69.89±0.20[d]	70.53±0.29[d]	77.28±0.30[c]	90.44±0.12[a]

2.4 产气量与干物质有效降解率的相关性分析

由表 9 可见，8 h 的产气量与干物质有效降解率呈现显著正相关关系（*P*<0.05），16、24、36、48 h 产气量及潜在产气量与干物质有效降解率呈极显著正相关关系（*P*<0.01），与 24 h 产气量相关

性最强[相关系数（R）=0.783]，其次是 36 h 产气量（R=0.782）和潜在产气量（R=0.744）。

表 9　产气量与干物质有效降解率的相关系数

Table 9　Coefficient correlation (R) of GP and effective degradation rate of DM

项目 Items	潜在产气量 Potential GP/(mL/g)	不同时间点的产气量 GP at different time points/(mL/g)						
		2 h	4 h	8 h	16 h	24 h	36 h	48 h
干物质有效降解率 Effective degradation rate of DM	0.744**	0.156	0.551	0.738*	0.733**	0.783**	0.782**	0.721**

*表示显著相关（P<0.05），**表示极显著相关（P<0.01）。表 11 同。

* indicated significant correlation（P<0.05）, and ** indicated extremely significant correlation（P<0.01）. The same as Table 11.

以 24、36 和 48 h 的产气量为参数建立的利用产气量预测干物质有效降解率的方程见表 10。由表可见，利用 3 个预测因子均可得出干物质有效降解率的预测模型，最佳预测因子为 24 h 产气量（R^2=0.613），其次是 36 h 产气量（R^2=0.612）和潜在产气量（R^2=0.553）。

表 10　产气量预测干物质有效降解率的方程

Table 10　Prediction of effective degradation rate of DM by GP

预测方程 Prediction equations	决定系数 R^2	P 值 P-value
ED_{IVDMD}=30.109+0.564GP_{a+b}	0.553	<0.01
ED_{IVDMD}=27.651+0.663GP_{24}	0.613	<0.01
ED_{IVDMD}= 22.953+0.670GP_{36}	0.612	<0.01

ED_{IVDMD}为干物质有效降解率；GP_{a+b}为潜在产气量；GP_{24}为 24 h 产气量；GP_{36}为 36 h 产气量。预测方程基于 13 种饲料产气量的实测值。

ED_{IVDMD} was *in vitro* effective degradation rate of DM; GP_{a+b} was potential GP;　GP_{24} was 24 h GP;　GP_{36} was 36 h GP. Prediction equations were based on the measured values of gas production of 13 feedstuffs.

2.5　常规营养成分与干物质有效降解率的相关性分析

由表 11 可见，干物质有效降解率与饲料 NDF 含量呈显著负相关关系(R=-0.852)，与饲料 ADF 含量呈极显著负相关关系（R=-0.880）。

表 11　常规营养成分含量与干物质有效降解率的相关系数

Table 11　Correlation coefficient of common nutrient component contents and effective degradation rate of DM

项目 Items	干物质 DM	粗蛋白质 CP	粗脂肪 EE	有机物 OM	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF
干物质有效降解率 Effective degradation rate of DM	-0.632	0.026	-0.134	0.521	-0.852*	-0.880**

利用单一精饲料的常规营养成分含量预测其干物质有效降解率的方程见表 12。由表可见，饲料 ADF 或 NDF 含量均可预测干物质有效降解率，随着预测因子的增加，方程的 R^2 增加；预测方程的最佳单一预测因子为饲料 ADF 含量，所建方程 R^2 为 0.775；以饲料 ADF 和 NDF 含量共同建立的干物质有效降解率预测模型 R^2 为 0.855。

表 12　饲料常规营养成分含量预测干物质有效降解率的方程

Table 12　Prediction equation for effective degradation rate of DM by common nutrient component contents in feedstuffs

预测方程 Prediction equations	决定系数 R^2	P 值 P-value
ED_{IVDMD}=85.812-0.774ADF	0.775	<0.01
ED_{IVDMD}=88.382-0.453NDF	0.727	<0.01
ED_{IVDMD}=88.481-0.484ADF-0.231NDF	0.855	<0.01

ED_{IVDMD} 为干物质有效降解率。预测方程基于除鸡肉粉外的 12 种饲料的营养成分含量实测值。

ED_{IVDMD} was *in vitro* effective degradation rate of DM. Prediction equations were based on the measured values of nutrient contents of 12 feedstuffs except chicken meal.

3　讨　论

3.1　单一蛋白质饲料的体外发酵特性

本试验结果表明，6 种蛋白质饲料原料的产气量与干物质有效降解率均随时间的延长呈不同程度的增加，其中，动物性蛋白质饲料鸡肉粉、鱼粉的 CP、EE 含量虽显著高于其他 4 种植物性蛋白质饲料，但其体外产气量和干物质有效降解率均较低，这是由于动物性蛋白质饲料具有天然过瘤胃蛋白质补充料的特殊属性所致[12]。李袁飞等[13]研究表明，豆粕的 48 h 产气量和干物质降解率均显著高于其他饼粕类蛋白质饲料。与本试验中豆粕的潜在产气量、干物质有效降解率均显著高于其他蛋白质饲料的结果相同。孔平等[14]研究表明，玉米蛋白粉在肉羊瘤胃内的干物质有效降解率为 72.86%，玉米蛋白粉为 59.66%。低于本试验所得结果，这可能是由于试验动物及试验方法不同造成的。李晓燕[15]试验测得 DDGS 和棉籽粕的干物质有效降解率分别为 50.04%和 46.82%，二者差异不显著，与本试验中二者干物质有效降解率（74.86%和 63.62%），差异显著的结果有较大差异。这 2 项研究的结果与本试验之间的差别可能主要是瘤胃液供体羊的品种、试验方法和饲料原料产地的不同造成的。在本试验中，虽然玉米蛋白粉、DDGS 与棉籽粕 3 种饲料的潜在产气量高低顺序与干物质有效降解率的规律不同，但三者的潜在产气量差异不显著，结果与张文璐等[16]体外产气量与体内干物质降解率呈高度正相关的结论一致。

3.2　单一能量饲料的体外发酵特性

本试验中所采用的 7 种能量饲料可分为 3 类，第 1 类为玉米及其副产物，其中包括玉米、喷浆玉米皮、未喷浆玉米皮；第 2 类为糠麸类能量饲料，其中包括麸皮、次粉和面粉；第 3 类为菊花粕。在第 1 类饲料中，玉米皮是在玉米深加工过程中产生的副产品之一，可作为优质的饲料资源，其氨基酸含量远高于玉米[17]。而喷浆玉米皮的干物质有效降解率为三者中最高，主要是因为其浸泡液中含有丰富的蛋白质及矿物质，大大提高了营养物质含量。在第 2 类饲料中，面粉的各营养成分含量及产气量在 7 种能量饲料中均处于中间水平，但其产气速率较高，干物质有效降解率显著高于其他饲料原料。苏华维等[18]在荷斯坦公犊牛饲喂全乳至 35 日龄后，向全乳中添加 6%廉价的小麦粉，结果表明添加小麦粉虽然会在一定程度上降低饲料的消化率却仍提高了犊牛的生长性能、屠宰性能，改善了肉质，降低了生产成本。因此，适宜添加量的面粉作为幼龄反刍动物饲料具有良好的营养价值和经济效益。第 3 类饲料菊花粕作为一种具有地域特色的非常规能量饲料，其常规营养成分中除 CP 含量较低且与玉米相近外，其他营养成分含量均显著高于其他 6 种能量饲料，其中 NDF、ADF 含量分别为 46.12%和 29.21%。刘洁[19]指出，NDF 的含量越高，饲粮的结构性碳水化合物含量越高，易消化的非结构性碳水化合物含量越低，从而降低了瘤胃微生物对营养物质的消化利用。这一结论解释了本试验中菊花粕的潜在产气量高而干物质有效降解率低于其他 6 种能量饲料的原因。

3.3 精饲料产气量与干物质有效降解率的相关性分析

饲料在一定时间内的产气量可以反映饲料原料被瘤胃微生物消化利用的情况，可代表饲料原料营养价值的高低[20]。潘美娟等[21]以 3 种不同粗饲料组合的全混合日粮为试验原料，进行了体外产气法与尼龙袋法的相关性分析，结果表明体外产气法与体内干物质有效降解率呈显著正相关，可以代替尼龙袋法。洪金锁等[22]用体外产气法与尼龙袋法评定青海当地燕麦青干草营养价值并进行相关性分析，其 R 为 0.98，表明体外产气法可替代尼龙袋法评价粗饲料的瘤胃发酵特性；任鹏等[7]测定了 6 种饼粕类蛋白质饲料的瘤胃有效降解率，结果表明持续发酵法与尼龙袋法结果的 R^2 高达 0.99，且相比尼龙袋法具有更好的重复性和稳定性，说明人工瘤胃持续发酵法可代替半体内尼龙袋法测定饲料的干物质有效降解率，具有大规模评定饲料蛋白质有效降解率、提高工作效率及瘘管动物利用率的优势。本试验将 6 种蛋白质饲料和 7 种能量饲料的产气量与干物质有效降解率进行了相关性分析，说明二者具有较高的相关性，与以上研究者的研究结果相似；也说明在评价单一精饲料瘤胃有效降解率的多种试验方法中，体外产气法是快速、简便、有效、低成本的方

法，值得推行和应用。

3.4　精饲料常规营养成分含量与干物质有效降解率的相关性分析

Nsahlai 等[23]对豆科田菁属牧草的研究发现，产气量与 NDF 的含量呈显著负相关，与 CP 含量间呈正相关。茹彩霞等[24]研究发现，干物质有效降解率与 CP 的含量呈显著正相关；陈晓琳[25]使用尼龙袋法建立了常规营养成分预测瘤胃干物质有效降解率的方程为：干物质有效降解率=92.666 5+0.113 5CP-0.636 6NDF-0.350 6ADF（R^2=0.85），表明饲料的干物质有效降解率与 CP 含量呈正相关关系，与 NDF 和 ADF 含量呈负相关关系。郭春燕等[26]研究表明，当 CP 含量高、粗纤维含量低时，精饲料产气量较高；当 CP 含量低、粗纤维含量高时，产气量较低；本试验结果与前人的试验结果基本相似，发现了精饲料的干物质有效降解率与 NDF、ADF 含量呈显著负相关关系。但本试验结果中，饲料的干物质有效降解率与 CP 的含量无显著相关关系，这可能是因为能量饲料与蛋白质饲料的蛋白质含量差异较大，影响了分析结果。

4　结　论

① 体外产气法可以代替尼龙袋法预测饲料的干物质有效降解率，可对饲料的降解性能做出快速、合理、有效的评价。

② 利用饲料中的纤维含量来预测其他主要营养物质在瘤胃内降解率的方法切实可行。

参考文献：

[1]　张小艳.南疆特色农业持续发展研究[D].硕士学位论文.武汉:华中师范大学,2008.

[2]　李冰.新疆南疆区域生态环境与经济协调发展研究[D].硕士学位论文.阿拉尔:塔里木大学,2015.

[3]　梁玉生,李发弟,李飞.高精料饲粮条件下反刍动物瘤胃适应机制的解析[J].动物营养学报,2016,28(1):20–26.

[4]　赵江波.肉用绵羊精料代谢能预测模型的研究[D].硕士学位论文.兰州:甘肃农业大学,2016.

[5]　吴端钦.用 CNCPS 对羊常用几种精饲料营养价值评定及有效能值预测模型的研究[D].硕士学位论文.大庆:黑龙江八一农垦大学,2009.

[6]　NORMAN H C,REVELL D K,MAYBERRY D E,et al.Comparison of *in vivo* organic matter digestion of native *Avstralian shrubs* by sheep to *in vitro* and in sacco predictions[J].Small Ruminant Research,2010,91(1):69–80.

[7] 任鹏,冯仰廉.体外持续发酵法评定反刍动物饲料干物质和蛋白质降解率的研究[J].动物营养学报,1989,1(1):16–17.

[8] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].北京:中国农业大学出版社,2003.

[9] VAN SOEST P J.Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages[J].Journal of Animalence,1967,26(1):119–128.

[10] MENKE K H,RAAB L,SALEWSKI A,et al.The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feeding stuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro*[J].The Journal of Agricultural Science,1979,93(1):217–222.

[11] ØRSKOV E R,MCDONALD I.The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage[J].The Journal of Agricultural Science,1979,92(2):499–503.

[12] 刁其玉.动物性蛋白质对反刍动物的营养[J].草食家畜,1990(6):32–35.

[13] 李袁飞,郝建祥,马艳艳,等.体外瘤胃发酵法评定不同类型饲料的营养价值[J].动物营养学报,2013,25(10):2403–2413.

[14] 孔平,陈傲东,赵伟利,等.玉米蛋白粉与豆粕在反刍动物瘤胃内降解动力学评定分析[J].西北农业学报,2014,23(11):30–34.

[15] 李晓燕.应用 NRC 和 CNCPS 体系评定陕北白绒山羊饲料营养价值的研究[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2013.

[16] 张文璐,李杰,吕元勋.体外产气法与尼龙袋法评定粗饲料干物质降解率的相关性分析[J].饲料工业,2009,30(7):30–32.

[17] 林谦,戴求仲,蒋桂韬,等.玉米及其加工副产品的营养价值评定[J].中国饲料,2013(4):18–21.

[18] 苏华维,刘丹丽,曹兵海,等.全乳添加小麦粉对荷斯坦公犊牛的屠宰性能及肉质的影响[J].中国农业大学学报,2008,13(6):66–70.

[19] 刘洁.肉用绵羊饲料代谢能与代谢蛋白质预测模型的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2012.

[20] 陶春卫.反刍动物常用粗饲料营养价值评定及其有效能值预测模型的建立[D].硕士学位论文.大庆:黑龙江八一农垦大学,2009.

[21] 潘美娟,徐国忠,徐晓明,等.体外产气法与尼龙袋法评定不同粗饲料组合的 TMR 干物质降解率的相关性分析[C]//第五届中国奶业大会论文集.西安:中国奶业大会,2014.

[22] 洪金锁,刘书杰,柴沙驼,等.体外产气法与尼龙袋法评定青海当地燕麦青干草营养价值[J].中国畜牧兽医,2009,36(3):36–38.

[23] NSAHLAI I V,SIAW D E K A,OSUJI P O.The relationships between gas production and chemical composition of 23 browses of the genus *Sesbania*[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,1994,65(1):13–20.

[24] 茹彩霞,昝林森,马陕红.模拟瘤胃条件下 5 种粗饲料干物质、中性洗涤纤维降解率的研究[J].中国畜牧杂志,2006,42(11):42–44.

[25] 陈晓琳.肉羊常用粗饲料营养价值和瘤胃降解特性研究[D].硕士学位论文.青岛:青岛农业大学,2014.

[26] 郭春燕,闫云峰,马全磊,等.基于体外瘤胃产气法评价四种精料的营养价值[J].黑龙江畜牧兽医,2016(11):148–150.

Correlation Analysis Between *in Vitro* Gas Production and Effective Degradation Rate of Common Concentrates for Mutton Sheep in Southern *Xinjiang*

MA Shaonan[1,2] XU Guishan[1,3*] WANG Xiaohui[1] ZHANG Kai[1] PAN Xiaoli[1] MA Tao[2] DIAO Qiyu[2*]

(1. *College of Animal Science, Tarim University, Alar* 843300, *China*; 2. *Key Laboratory of Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*; 3. *Key Laboratory of Tarim Animal Husbandry Science and Technology*, *Xinjiang Production and Construction Corps, Alar* 843300, *China*)

Abstract: In order to explore the simple method for evaluating effective degradation rate （ED） of dry matter （DM） of concentrate, the correlation analysis between *in vitro* GP and ED of common concentrates for mutton sheep in southern *Xinjiang* was carried out. Six kinds of protein feedstuffs and 7 kinds of energy feedstuffs were used as experimental material. Gas production (GP) and ED of DM were detected by *in vitro* GP method and continuous artificial rumen fermentation method. In the meantime,

*Corresponding authors: XU Guishan， associate professor, E-mail: guishanxu@126.com； DIAO Qiyu， professor， E-mail: diaoqiyu@caas.cn （责任编辑 王智航）

the effects of common nutrients on ED of DM as well as the correlation between GP and ED of DM were analyzed. Estimation models based on GP and common nutrients to predict ED of DM were established. The results showed as follows: 1) potential GP and 8, 16, 24, 30, 36 and 48 h GP had positive correlations with ED of DM (P<0.05); the correlation efficiencies of prediction models of ED of DM based on potential GP, and GP at 24 and 36 h were the highest, and the coefficients of determination (R^2) were 0.553, 0.613 and 0.612, respectively. 2) In results of correlation analysis between common nutrient contents and ED of DM, ED of DM had significantly negative correlation with neutral detergent fiber (NDF) (P<0.05) and acid detergent fiber (ADF) contents (P<0.01); single factor and two factors estimation models for ED of DM were established based on ADF and NDF contents, and the two factors estimation model [ED_{IVDMD}=88.481-0.484ADF-0.231NDF （P<0.01， R^2=0.855）（ED_{IVDMD} was ED of DM）] had higher R^2. In conclusion, *in vitro* GP method can replace the nylon bag method to estimate ED of DM， and make a quick, reasonable and effective evaluation on the degradation characteristic of common concentrate feedstuffs for mutton sheep; fiber content in feedstuffs can be used to predicate degradation rate of other main nutrient in rumen.

Key words: *in vitro* gas production; continuous artificial rumen fermentation; gas production; effective degradation rate of dry matter; concentrate; estimation model